

計算機制御による破壊過程の破壊力学的研究 (第2報)

——オンラインK関数演算制御疲れ試験機の適用例——

The fracture mechanics analysis of fracture processes by digital computer control (The second report)

——Some applications of a fatigue testing machine with on-line K function calculation control——

北川英夫*・岡村弘之**・大平寿昭*・Y. S. Choy***

Hideo KITAGAWA, Hiroyuki OKAMURA, Toshiaki OHIRA and Y. S. Choy

既報(第1報)¹⁾のごとく新しく開発されたオンラインK関数演算制御疲れ試験機の基本的適用例を紹介する。開発の主目標であった構造物シミュレーション疲れ試験や各種のK制御試験のほか、応用的適用例として、無人運転、予備き裂の自動付与、公称応力制御なども含めて列記する。

既報(第1報)¹⁾に述べたごとく、構造物や複合材料の疲れ破壊過程に代表されるような複雑な破壊過程を解析するため、破壊力学的に破壊の進行過程を自由に制御しつつ疲れ試験を行なうことを提案し、これに必要なオンラインK関数演算制御疲れ試験システムとその関連機器を開発した。

今回はその基本的な適用例の若干を紹介する。以下の適用例中、K関数制御によるき裂成長シミュレーション試験や、定 ΔK 制御、定 $d(\Delta K)/da$ 制御などは開発の主目標であった諸試験であり、他の諸例、たとえば、無人運転や残断面応力制御などは、開発されたK関数制御疲れ試験機の応用的適用例または効用である。

初めに、K関数制御の基本フローチャートを図1に示す。このK関数 $[K=F(a)]$ の選択により各種のK関数演算制御を行なおうとするのが、最も単純かつ基本的な制御構成である。

1. 疲れき裂実験の無人化

破壊力学的手法による疲れ試験では、K関数制御であると荷重制御であるとを問わず実験者の継続的き裂測定の仕事が問題になる。これを無人化することは、この試験機の大きな効用である。その無人追従が可能であることを検証した実験例を図2に示す。これは、高張力鋼HT-80の中央き裂引張平板の定荷重疲れ試験結果であり、クラックフォロアおよび移動読取顕微鏡による両測定値を併記し、この目的には十分使用に堪えることを示す。プリンタには刻々のK値も同時に記録されている。

2. preformed crack の付与の自動化

破壊靱性試験片にASTM規格等に指定された方法で

*東京大学生産技術研究所第1部
**東京大学工学部船用機械工学科
***成均館大学工学部機械工学科

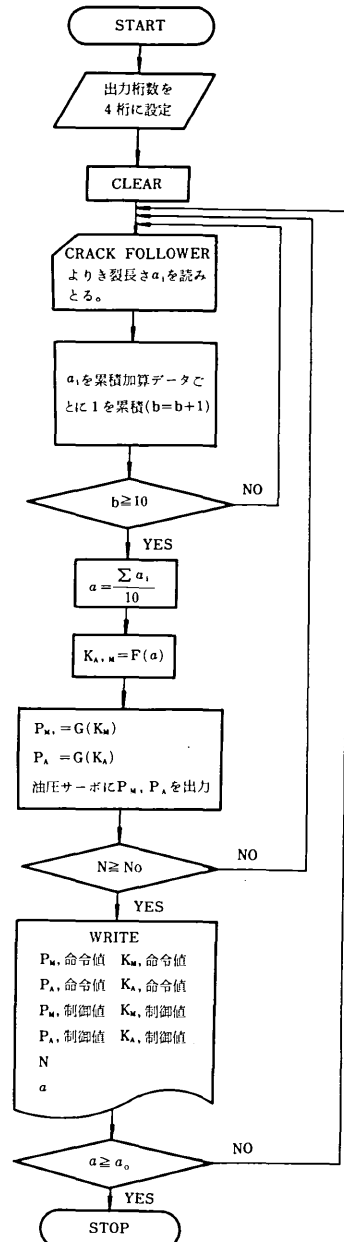


図1 K関数制御フローチャート

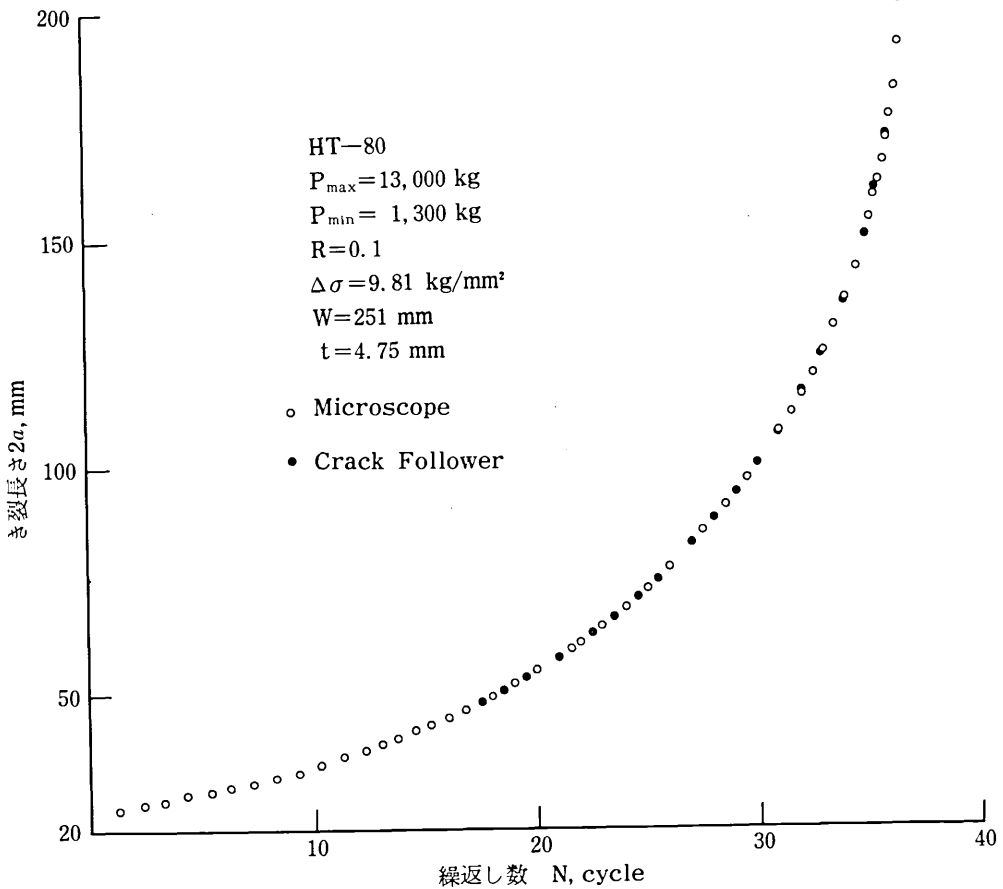


図2 クラックフォロアと移動読取顕微鏡により求めたき裂長さaの比較

指定された寸法の予備疲れき裂を入れること、ならびに、広域の $\Delta K \sim da/dN$, $\Delta K_1 \sim N_f$, $K \sim da/dt$, $K_1 \sim t_f$ (ΔK_1 , K_1 はそれぞれ ΔK , K の初期値, N_f , t_f は破断までの繰返し数と時間を示す)などの諸特性を求めするために予備疲れき裂(または初期疲れき裂)を入れることは、時に主目的である本実験よりも注意と労力と時間を必要とし、これを自動化することは破壊力学の研究の効率化に必要である。本試験機を使えば適当なプログラムにより指定した ΔK で指定した長さに初期き裂を入れることができる。本報の諸実験の初期き裂にはこうして入れたものを含んでいる。

3. 反復き裂成長試験

設計や応用研究の基準特性として用いる $\Delta K \sim da/dN$ 線図は労力・時間の関係から1本の試験片で決定することがしばしばあるが、これは好ましいことではない。数本の試験片の結果から決定する方が好ましいが、労力や時間の関係もあって実際に行なわれることは少ないようである。本試験機と広幅試験片を用いれば、1本の試験片で数本分のデータを連続して求めることが

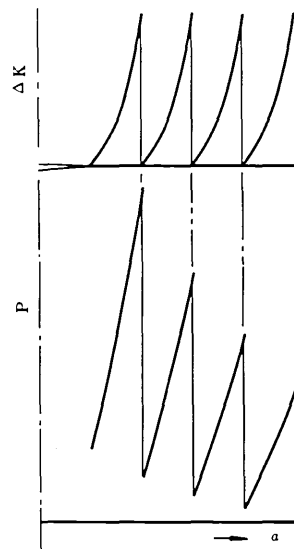


図3 反復き裂成長試験におけるKのプログラムと荷重Pの変化

研究速報
 できる。小型試験片による数回の定荷重疲れ試験をシミュレートした、広幅試験片の疲れ試験のKのプログラムとそれに制御された荷重Pの変化を図3に模式的に示す。

4. 定ΔK疲れ試験

従来連続的なΔK一定制御の疲れ試験はかなりの労力と技術・経験を要したが、図4のようなプログラムを組むことにより広領域の連続制御が容易にできる。き裂の成長速度 da/dN は、 $da/dN=f(\Delta K)$ なので、繰返し数Nとき裂長さaとの関係が図5のように広域でほぼ直線、すなわち da/dN がほぼ一定との結果が得られた。これは、き裂端の力学的条件を一定に保ちえたことになり、若干精度は落ちるが、各ΔKレベルでの da/dN のバラッキ等の統計的研究や環境疲れの研究で環境因子のみ抽出したい場合に利用できる。前者の例を図5中に示す。後者の場合は、き裂追従系として電気ポテンシャル方式の方が好ましいかと思われるが、この方式では一般にき裂の表面長を測れないので移動顕微鏡と測定対象量が同一でないのではないかと考えられる。

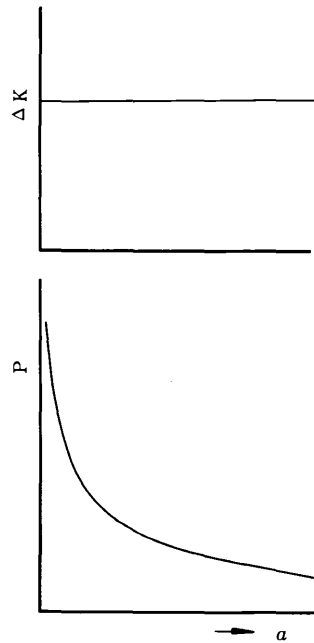


図4 定ΔK試験におけるKのプログラムと荷重Pの変化

5. 定 $d(\Delta K)/da$, 定 $d(\Delta K)/dN$ 制御疲れ試験

ΔKの空間的・時間的変化率 $d(\Delta K)/da, d(\Delta K)/dN$

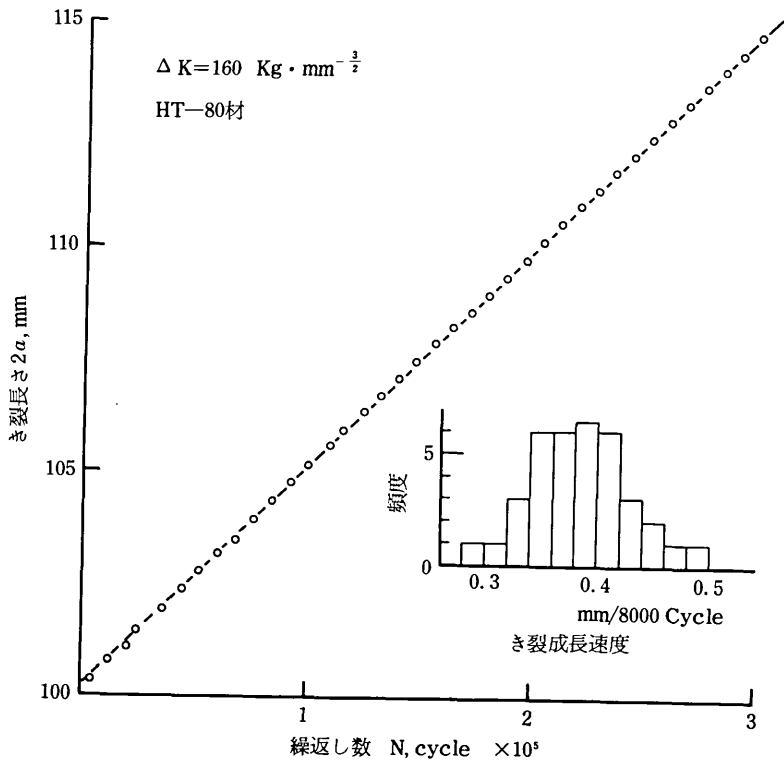


図5 プログラムによる定ΔK疲れ試験

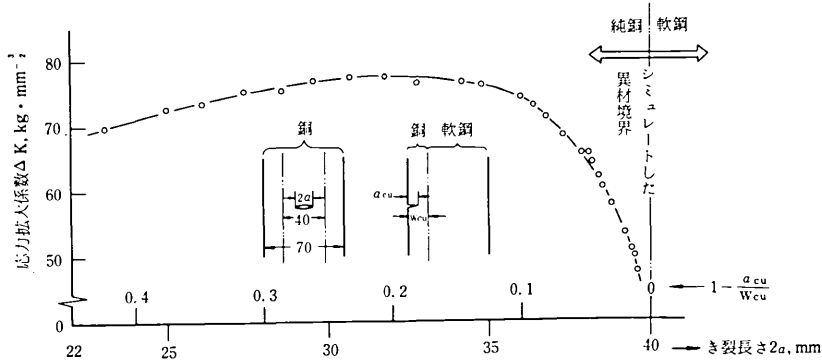


図6 銅鋼複合材境界に銅から垂直に接近するき裂とK変化

が大きい時、き裂成長速度が通常の $\Delta K \sim da/dN$ 関係から離れることがあるらしいことが経験的に知られている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。この問題は変動荷重、切欠きからのき裂成長、構造物中のき裂成長、 ΔK_{TH} の決定などの研究にとって重要である。 ΔK を一定の変化率で連続に変えることは、本試験機のいわば特技である。これについては、太田・佐々木各氏⁽⁵⁾⁽⁶⁾や著者ら⁽⁷⁾による詳しい報告があるので参照されたい。

6. 構造物中または複合材料中のき裂成長シミュレーション試験

補剛材溶接部、変厚溶接部、複合材料などでき裂成長に伴うK変化が単純でない場合、このK変化をシミュレートして平板等の単純形状の試験片で疲れき裂成長の実験をすることができれば、経費と労力と技術的困難の多い実物の疲れ試験に代用することができる。また材質の不均質性や異方性、残留応力などを含む実物の結果とこれらの力学的シミュレーション試験の結果を比較すれば、これらの諸因子の影響と単なる力学的境界条件の影響の分離を行なうこともできよう。これらの研究方法をK関数制御試験のもっとも重要な用途として提案したい。銅と鋼との複合材料の結合境界に銅側から垂直に接近するき裂のK変化⁽⁸⁾のモデルを図6に、これをシミュレートして均質の銅板試験片で行なった疲れ試験の例を図7に示す。 ΔK の急速な低下の影響が da/dN の異常低下に現われている。

7. 残断面平均応力 (公称応力) 制御疲れ試験

応力一定の疲れ試験できわめてよい直線関係の $a-N$ 曲線 (き裂長さ一繰返し数曲線) が Weibull⁽⁹⁾、瓜生ら⁽¹⁰⁾によって与えられていた。これらの結果は、Kに無関係に da/dN が一定で、 da/dN のK依存性を否定するかのような印象を与えていた。しかし、これらの実験の多くはき裂部の残断面平均応力 (すなわち公称応力) 一定制御の実験であったと聞く。これはたとえば幅Wの中央き裂の試験片ならば、ある程度長い初期き

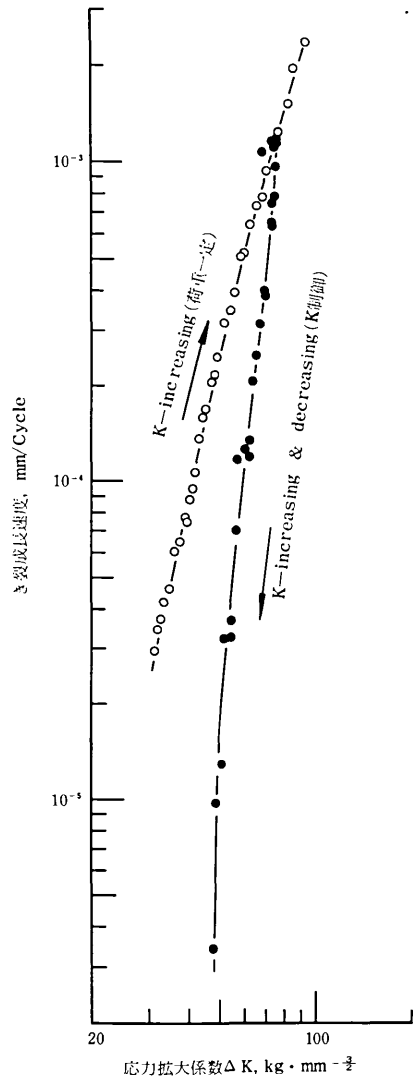


図7 図10を銅板中でシミュレートした疲れ試験

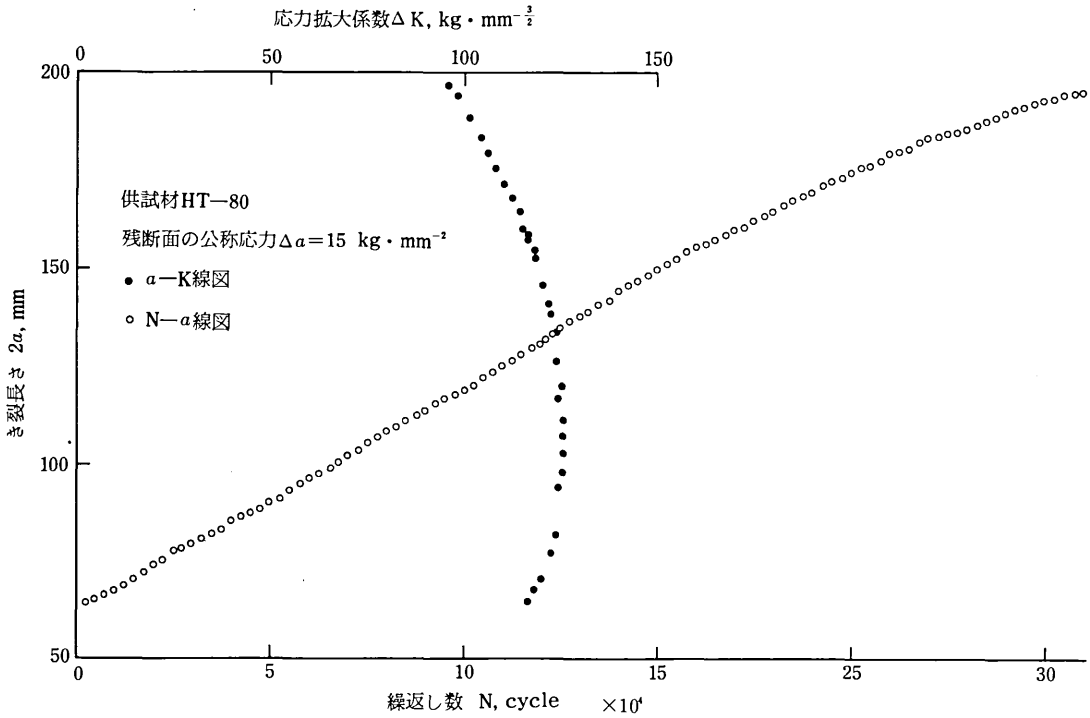


図8 残断面の公称応力一定疲れ試験

裂から $K = \frac{P}{WB} (1 - 2a/W) \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec(\pi a/W)} (\pi a/W)$ のK関数制御疲れ試験を行なったと等価である。本試験機によりK関係制御でこれを再現した実験結果とこの時のKの変化を図8に示す。図からWeibullらのデータも結局はK依存性を維持していたことは明らかである。

8. 漸減荷重 ΔK_{TH} 決定試験

疲れき裂が顕著な成長を継続できる下限条件としての ΔK 値、すなわち ΔK_{TH} の値は安全設計にとってももっとも重要な数値であるが、この値を ΔK -decreasing試験で決定することが多くなった⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。その場合の ΔK_{TH} の値が荷重低下履歴の影響を受けることが最近問題になっている。この前歴の影響を極力減らすため微小ステップの ΔK 漸減法などがとられている⁽³⁾が、これは多大の注意と労力を要する実験である。本試験機の長時間精度がもし保証できるならば、前述の $d(\Delta K)/dN$, $d(\Delta K)/da$ の影響に適當な考慮を払いつつ、K関数制御で ΔK_{TH} 決定のための有効な実験が行なえることになる。これについては、太田・佐々木両氏の研究⁽⁴⁾があり、荷重履歴の影響のないデータが得られたとのことである。

9. おわりに

K関数制御を始め、破壊力学パラメータ制御による疲れ試験・応力腐食われ試験・動的き裂伝ば試験など

はまだ始まったばかりと言えよう。開発すべき興味ある試験方法が多く残されており、それらに関心を持たれる方々に御参考となれば幸である。ここに述べた応用面の開発には、日本大学池田健教授、同大学院生豊平氏の御協力を得た。記して深謝する次第である。

(1975年10月27日受理)

参考文献

- 1) 北川, 岡村, 大平, Choy; 生産研究, 27, 12 (1975-12)
- 2) 中沢, 小林; 18回疲労と破壊国内総会シンポジウム論文集, (1973) 76
- 3) 北川, 松本; 機械学会関西支部第48期講演論文集, (1973-3) 76
- 4) 河合; 機械学会講演論文集, 730-12 (1973-10) 47
- 5) 太田, 佐々木; 機械学会講演論文集, 750-1 (1975-4) 123
- 6) 佐々木, 太田; 機械学会講演論文集, 750-13 (1975-10) 261
- 7) 北川, 池田, 豊平, 大平, Choy; 機械学会講演論文集, 750-13 (1975-10) 229
- 8) 山崎, 北川, 渡辺, Choy; 機械学会講演論文集, 750-1 (1975-4) 9
- 9) W. Weibull; Proc. Crack Prop. Symp., Cranfield (1961) 271
- 10) 瓜生; Proc. 3rd Jap. Cong. Test. Mat., (1960) 40